



**INSTITUTO SUPERIOR MINERO-METALURGICO
“DR. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ”
FACULTAD METALURGIA-ELECTROMECÁNICA
DEPARTAMENTO DE METALURGIA Y QUIMICA**

**Evaluación físico-metalúrgica del acero
HK-40 utilizado en la salida de los alambiques
de destilación de cola lixiviada**

**Tesis en opción al título de Ingeniero en Metalurgia
y Materiales**

Autor: Antonio Cedeño López

**Moa-2019
“Año 61 de la Revolución”**



**INSTITUTO SUPERIOR MINERO-METALURGICO
“DR. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ”
FACULTAD METALURGIA-ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO DE METALURGIA Y QUIMICA**

Evaluación físico-metalúrgica del acero HK-40 utilizado en la salida de los alambiques de destilación de cola lixiviada

**Tesis en opción al título de Ingeniero en Metalurgia
y Materiales**

Autor: Antonio Cedeño López

Tutores: Ms.C. Ing. Eider Gresesqui Lobaina, Prof. Inst.
Ing. Maribel Cañete Utria, Prof. Inst
Ing. Salder Sánchez Hechavarría.

**Moa-2019
“Año 61 de la Revolución”**

Declaración de autoridad

Yo: Antonio Cedeño López, autor del presente Trabajo de Diploma, con el Ms. C. Ing. Eider Gresesqui Lobaina, la Ing. Maribel Cañete Utria y el Ing. Salder Sánchez Hechavarría, fungiendo como tutores, declaro la propiedad intelectual del mismo al servicio de la Universidad de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez”, para que esta entidad disponga de su uso como estime conveniente.

Antonio Cedeño López

Ing. Maribel Cañete Utria, Prof. Inst.

Ms. C. Ing. Eider Gresesqui Lobaina, Prof. Inst.

Ing. Salder Sánchez Hechavarría

Pensamiento



“La educación tiene un deber ineludible para con el hombre, no cumplirlo es criminal: conformarle a su tiempo sin desviarle de la grandiosa y final tendencia humana”.

José Martí

Agradecimientos

Agradezco a la Revolución Cubana por darme la oportunidad de estudiar Ingeniería en Metalurgia y Materiales

A mis tutores Maribel y Eider por la confianza depositada, por su constante preocupación y por la ayuda prestada para la realización de esta investigación.

Al colectivo de profesores del departamento de Metalurgia por el trabajo realizado estos seis años.

A mis familiares por el apoyo incondicional en especial a mis padres Alcides e Inés y mi esposa, por ser fuentes de inspiración, apoyo en momentos difíciles, por la preocupación mostrada y por todos los consejos.

A mis compañeros de trabajo por la ayuda brindada y la constante preocupación.

A mis compañeros de aula: Leober, Maday (casa sola), Nayelis, Lili, Yaquelin, Sailis y Ernesto por ser pacientes y acompañarme como hermanos durante estos años, por cada consejo y momento de ayuda.

A quienes de forma desinteresada ayudaron a la realización de este trabajo.

A los nombrados hoy y a quienes imperdonablemente no he podido recordar mis agradecimientos sinceros y desde mi corazón.

A todos muchas gracias

El autor

Dedicatoria

Dedico este trabajo de diploma a mis padres, que siempre están presentes en mi vida, a mi esposa Maylín Sánchez Rodríguez, por el apoyo y comprensión brindada, y en especial a mi hija Anayelis para que le sirva de ejemplo.

Resumen

El trabajo tiene como objetivo determinar las propiedades físico-metalúrgicas de la aleación de acero HK-40, fundida en la empresa “Comandante Gustavo Machín Hoed de Beche” de Moa. Se realizó el proceso de fundición en un horno de inducción con crisol de alta frecuencia y se analizaron tres muestras obtenidas y preparadas mecánicamente. En el análisis microestructural se determinó que la misma es dendrítica, compuesta por una matriz austenítica rodeada con zonas interdendríticas de islas de carburos primarios de tipo $M_{23}C_6$. Además de la existencia de ferrita en los límites de granos, en la que se observan precipitados de carburos. Posee una dureza promedio de 166,8 HV por lo que se estima que es adecuada para el trabajo como ducto de transportar colas lixiviadas.

Abstract

The objective of the work is to determine the physical-metallic properties of the steel alloy HK-40, cast in the company "Comandante Gustavo Machín Hoed de Beche" of Moa. The melting process was carried out in an induction furnace with a high frequency crucible and three samples prepared and mechanically were analyzed. In the microstructural analysis it was determined that it is dendritic, composed of an austenitic matrix surrounded by interdendritic zones of islands of primary carbides of type $M_{23}C_6$. In addition to the existence of ferrite in the grain boundaries, in the observation of carbide precipitates. It has an average duration of 166.8 HV for which it is estimated that it is suitable for work as a transport pipe leached colas.

ÍNDICE	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL DE LA INVESTIGACIÓN	5
1.1. Introducción.....	5
1.2. Descripción del proceso tecnológico de la planta de recuperación de amoníaco	5
1.3. Características del hidrotransporte de colas lateríticas en el proceso Caron ...	7
1.4. Composición granulométrica y química de las colas del proceso Caron.....	8
1.5. Perforaciones en las tuberías de acero	9
1.6. Generalidades de los aceros inoxidable austeníticos	10
1.6.1. Aceros inoxidable fundidos	11
1.7. Aleaciones resistentes a la corrosión y altas temperaturas	13
1.8. Características de los aceros aleados al cromo	14
1.9. Defectos de los aceros aleados al cromo.....	17
1.10. Influencia de los elementos de aleación en los aceros inoxidable.....	19
1.10.1. Influencia del cromo en la microestructura de los aceros inoxidable	21
1.11. Conclusiones del Capítulo I	23
CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS.....	24
2.1. Introducción.....	24
2.2. Proceso de obtención de las muestras	24
2.3. Condiciones experimentales y preparación de probetas	25
2.4. Ensayo de la composición química de la aleación.....	26
2.5. Preparación metalográfica de las muestras	27
2.5.1. Ataque químico de las muestras.....	28
2.6. Examen microestructural y del porcentaje de microconstituyentes	28
2.7. Evaluación de la dureza.....	30
2.8. Ensayo de microdureza	31
2.9. Conclusiones del capítulo 2.....	33
CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.....	34

3.1.	Introducción.....	34
3.2.	Análisis de la composición química obtenida	34
3.3.	Análisis microestructural de las muestras.....	35
3.3.1.	Análisis del por ciento de microconstituyentes	37
3.4.	Análisis de la dureza de las muestras.....	39
3.5.	Análisis de la microdureza de las muestras.....	40
3.6.	Costo de fabricación de la tubería en T	40
3.7.	Planteamiento de los efectos sociales y ambientales.....	42
3.7.1.	Población vinculada al área de riesgo	43
3.8.	Conclusiones del capítulo	44
	CONCLUSIONES GENERALES	45
	RECOMENDACIONES	46
	BIBLIOGRAFÍA	47

INTRODUCCIÓN

El municipio de Moa, se encuentra situado en el nordeste de la provincia de Holguín. Este representa un lugar estratégico para el desarrollo económico e industrial de la isla de Cuba, puesto que posee extensiones de terreno rico en níquel (Ni) y cobalto (Co), productos estos cotizados a nivel mundial.

Una de las entidades encargadas de la explotación de estos minerales es la fábrica Ernesto Che Guevara (ECG). Esta se halla localizada al norte del yacimiento de mineral de Punta Gorda, en la costa norte de la provincia Holguín entre los ríos Moa y Yagrumaje, a 4 km de la ciudad de Moa y a 2 km del pueblo de Punta Gorda.

El esquema tecnológico de esta empresa está basado en el proceso de lixiviación de carbonato amoniacal de mineral reducido, o proceso Caron. En este, se extrae el Ni y el Co de la pulpa del mineral reducido y aireada en un sistema a contracorriente con licores de carbonato amoniacal, obteniendo un licor enriquecido de Ni y Co y una pulpa empobrecida de estos dos elementos, pero con contenido de amoníaco que se recupera posteriormente.

La planta de Recuperación de Amoníaco-Cobalto, cumple la función de limpiar los licores provenientes de la primera etapa de lixiviación para luego descobaltizar y obtener el sulfuro de níquel y cobalto como un producto comercializable, además de destilar el licor descobaltizado para obtener el carbonato de níquel, destilar la cola para recuperar amoníaco y producir el licor fuerte que se alimenta a la planta de Lixiviación y Lavado.

La cola se distribuye por precalentadores, para aumentar la temperatura alrededor de unos 50°C antes de enviarla a las columnas de destilación (alambiques), recuperando parte del calor de los gases desprendidos de las propias columnas. A la salida de los alambiques, el producto desciende por una tubería de 300 mm de diámetro, pasa por un colector o válvula que amortigua la presión ejercida por el fluido antes de descargar en las tuberías de acero al carbono, que lo conducen por gravedad al pozo de cola.

En la salida, el líquido (cola) desciende por tuberías en T. Por el alto grado de abrasividad del mismo, están ocurriendo perforaciones que ocasionan el derrame de este. El material de los conductos dañados es acero AISI 1045 con 30 años de explotación. No obstante, se toma como medida la sustitución por acero austenítico refractario HK-40, puesto que en teoría se considera una aleación con mejores propiedades de resistencia al desgaste. En la práctica y para las condiciones de trabajo específicas, esta aleación no se ha estudiado.

Por esta razón, en el presente trabajo se plantea la siguiente **situación problemática**:

El objeto 19 de la planta de Recuperación de Amoniaco de la Empresa ECG, está destinada a destilar la cola proveniente del proceso de lixiviación. Una vez salido de los alambiques de destilación, este líquido es transportado hasta los pozos de recolección de colas. En la descarga del fluido se están produciendo perforaciones en las tuberías de acero AISI 1045, producto del alto grado de abrasividad de la cola. Por esta razón, ocurre el derrame y pérdida de este, con sus respectivos daños al entorno laboral y a la economía de la empresa. Como medida, se sustituye el material dañado por un acero austenítico refractario HK-40. Se hace necesario el estudio de esta aleación, pues en la práctica no ha sido evaluado para ser empleado en las condiciones antes expuestas.

De lo anterior se infiere como **problema de la investigación**:

Insuficiente conocimiento de las propiedades físico-metalúrgicas del acero austenítico refractario HK-40, para ser utilizada como tubería en la salida de los alambiques de destilación de cola lixiviada.

Objeto de estudio:

Aleación de acero austenítico refractario HK-40 para ser utilizado en la descarga del proceso de destilación en la planta de recuperación de NH_3 .

Y su **campo de acción**:

Propiedades físico-metalúrgicas de la aleación objeto de estudio.

A partir del objetivo general declarado, se establece la siguiente **hipótesis**:

Con una caracterización físico-metalúrgica, donde se considere el análisis microestructural, el establecimiento de la micro y macrodureza de la aleación de acero austenítico refractario HK-40 y se tengan en cuenta las propiedades de la cola destilada, se podrá fundamentar el uso de esta aleación como tubería en la salida de los alambiques de destilación.

Se define como **objetivo general**:

Establecer las propiedades físico-metalúrgicas en función de las durezas y de los microconstituyentes de la aleación en estudio.

Para la investigación se establecen los siguientes **objetivos específicos**:

1. Definir las regularidades del comportamiento metalúrgico en base a la microestructura, los microconstituyentes y las propiedades físico-mecánicas del acero austenítico refractario HK-40, usada en la tubería de descarga de la cola destilada en la empresa ECG de Moa.
2. Establecer el procedimiento metodológico para determinar las propiedades físico-metalúrgicas del acero austenítico refractario HK-40.
3. Determinar el costo económico del material.

Para dar cumplimiento a los objetivos específicos se desarrollan las siguientes **tareas**:

1. Establecimiento del estado del arte y teorías relacionadas con los aceros austeníticos y la cola destilada.
2. Preparación metalográfica de muestras de acero austenítico refractario HK-40, para determinar los elementos químicos presentes.
3. Aplicación de ensayos de dureza y microdureza.
4. Aplicación de la técnica de microscopía óptica, para definir las regularidades del comportamiento microestructural de la aleación.

5. Obtención y análisis de las regularidades metalúrgicas y del comportamiento microestructural de la aleación objeto de estudio.
6. Planteamiento de los efectos sociales y ambientales.

CAPÍTULO 1.

**MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL DE LA
INVESTIGACIÓN**

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Introducción

Los aceros inoxidable son utilizados en la industria, en la confección de piezas donde se requiera resistencia a la abrasión y otros fenómenos. Uno de los más empleados es el acero HK-40, con propiedades anticorrosivas en condiciones adversas. El presente capítulo tiene como **objetivo:** realizar una búsqueda bibliográfica que permita establecer el estado del arte y teorías relacionadas con las fundiciones de acero austenítico HK-40 y la cola destilada.

1.2. Descripción del proceso tecnológico de la planta de recuperación de amoniaco

La planta de Recuperación de Amoniaco-Cobalto, cumple la función de limpiar los licores provenientes de la primera etapa de lixiviación para luego descobaltizar y obtener el sulfuro de níquel y cobalto como un producto comercializable, además de destilar el licor descobaltizado para obtener el carbonato de níquel, destilar la cola para recuperar amoníaco y producir el licor fuerte que se alimenta a la planta de Lixiviación y Lavado.

El licor producto de la I Etapa de la Unidad Básica de Producción (UBP) de Lixiviación y Lavado, se bombea hacia la sección de Recuperación de Amoníaco, recibiendo en una serie de turbos que se encuentra en operación y de estos se bombea mediante bombas (BO 104 A, B, C y D) con capacidad de 220 m³/h a los filtros de hojas (FL 105 al 110), donde se disminuye el sólido en suspensión de 360 hasta ≤ 20 p.p.m. o (20 mg/L). El licor filtrado es almacenado en el tanque (TK 118) de 3 000 m³ y de este es bombeado a la sección de Separación de Cobalto. Desde el TK 118, el licor filtrado es bombeado por las bombas BO 121 E, F con capacidad de 280-320 m³/h y la bomba BO 121 H de 500 m³/h, hacia los tanques agitados (TK 128, 129 y 130 C) de 70 m³ cada uno, ubicados en la plataforma de los Turboaeradores de la III etapa de la UBP de Lixiviación y Lavado, a los que se le adiciona la pulpa recirculada desde el fondo de los sedimentadores.

La pulpa desde el tanque TK 130 C es bombeada con las bombas BO 131 A o B de $500 \text{ m}^3/\text{h}$ de capacidad, hasta el sedimentador SD 234; haciéndola pasar a través del reactor tubular que garantiza la velocidad mínima exigida y el tiempo de residencia, donde se le adiciona el reactivo de precipitación, sea el NH_4HS o el $(\text{NH}_4)_2\text{S}$; y se produce la reacción de precipitación del Co y parte del Ni contenido en el licor, lográndose un sulfuro mixto con relación Ni/Co que oscila de 1,5 a 2,0.

La pulpa de sulfuros mixtos con una densidad no menor a $1\ 060 \text{ g/L}$ será bombeada desde el fondo del SD 234 mediante las bombas centrifugas BO 236 B y C, con una capacidad de 40 a $50 \text{ m}^3/\text{h}$ cada una, una parte hacia el TK 128 C para fase I y la otra hacia el TK 124.

En la sección se recibe una parte de licor de segunda etapa de lixiviación para la precipitación del Co y parte del Ni contenido en el licor. El licor descobaltizado se recibe en los tanques TK 119 y 120 de la sección de Recuperación de Amoniaco, desde donde se bombea a las torres de destilación de licor producto. Aquí se separa parte del NH_3 y CO_2 , formándose el precipitado de carbonato básico de Ni que es descargado de dichas torres a una presión aproximadamente igual a $0,8 \text{ kgf/cm}^2$ o $(78\ 453,2 \text{ Pa})$, por lo que se envía a dos tanques depresurizadores, desprendiéndose parte del agua de la pulpa de carbonato en forma de vapor que pasa a través de las chimeneas de dichos tanques al sistema de separación de partículas. El licor antes mencionado se somete al proceso de destilación.

Los gases obtenidos de NH_3 , CO_2 y H_2O se enfrían en intercambiadores de calor de tubo y coraza hasta una temperatura 57 a 60°C , formando una mezcla líquido-gas que son enviados al proceso de absorción.

La cola enviada desde la UBP Lixiviación y Lavado se distribuye por los precalentadores, cuya función es aumentar la temperatura de la cola antes de enviarla a las columnas de destilación, recuperando parte del calor de los gases desprendidos de las propias columnas.

La pulpa caliente alrededor de unos 50°C se descarga por gravedad desde los precalentadores hasta los tanques de retención de cola, desde donde se bombea

hasta las torres de destilación. La pulpa descargada de estas torres a una presión aproximada de 0,8 kgf/cm² o (78 453,2 Pa) se envía por gravedad a dos tanques depresurizadores. La pulpa depresurizada pasa por gravedad al pozo de cola desde donde se bombea hasta el dique de cola.

1.3. Características del hidrotransporte de colas lateríticas en el proceso Caron

Las colas son mezclas compuestas de partículas sólidas de mena laterítica en suspensión acuosa, con cierta cantidad de amoníaco disuelto, que al ser conducidas a través de tuberías forman un flujo trifásico.

Los sistemas de hidrotransporte utilizados para el trasiego de colas reportan altos consumos de energía asociados, en gran medida, a las pérdidas de carga, las que a su vez están determinadas por el diámetro de la conductora, su estado de explotación, el material de la tubería, el régimen de trabajo de la instalación y las propiedades físico-mecánicas de las colas.

Investigaciones previas (Darby, 2001; Turro *et al.*, 2002; Rojas & Turro, 2003) revelan que desde el punto de vista reológico, las colas lateríticas se comportan como un fluido plástico según el modelo de Bingham. En ellas predominan las fases minerales maghemita y magnetita, con un tamaño de partícula mayoritario de 43 micrones, lo que favorece un comportamiento polidisperso.

Según Turro *et al.*, 2008, la densidad de las colas varía en función de la temperatura a la que se transportan según se muestra en la tabla 1.1.

Tabla 1.1. Comportamiento de la densidad según temperatura

Temperatura (°C)		
28	60	90
Densidad de las suspensiones (kg/m ³)		
1230	1190	1046
1300	1235	1105
1500	1425	1275
1650	1568	1400
1750	1663	1488

Durante el hidrotransporte de colas del proceso Caron se presentan, principalmente, dos regímenes de movimiento: estructural (laminar) y turbulento; no se distingue la existencia de una zona de transición, cambiando el régimen de manera brusca. El cambio de régimen de flujo tiene lugar a distintos valores de velocidad, los que aumentan en la medida en que lo hace la concentración de sólidos.

Es necesario indicar que una de las peculiaridades del flujo de las colas es la zona transitoria entre el régimen laminar y el turbulento. De esta manera, para una concentración de 40 ó 50 % de peso en sólido, al incrementar la temperatura desaparecen más rápido las propiedades estructurales de las colas y se manifiesta un cambio en la distribución del perfil de velocidades por la sección transversal de la tubería (Izquierdo, 2001).

1.4. Composición granulométrica y química de las colas del proceso Caron

Es conocido que en el hidrotransporte de colas lateríticas influyen factores de diversa índole, entre los que cabe mencionar la composición de la materia prima mineral. Si la composición química y mineralógica de la materia prima mineral que ingresa al proceso es determinante en la calidad del producto final, el conocimiento de la composición sustancial de las colas obtenidas en cada etapa del proceso metalúrgico es un elemento para considerar, que puede incluso contribuir a incrementar la eficiencia del mismo mediante la modificación de ciertos parámetros operacionales; además, permite trazar líneas perspectivas para el uso de las colas.

Según Rojas & Turro (2003), atendiendo al contenido en % en peso, las colas de la planta de recuperación de amoniaco presentan tres grupos granulométricos principales: el primero, formado por una fracción granulométrica más fina menor de 0,0044 mm, que representa alrededor del 66 % en peso de la muestra; el segundo agrupa las clases granulométricas con +0,175 mm, -0,147+0,074 mm y -0,074+0,044 mm y constituye alrededor de un 33 % en peso; el tercer grupo lo

integra la clase granulométrica de 0,175+0,147 mm, algo gruesa, con cerca del 2,7 % en peso de la muestra.

Estos resultados permiten afirmar que las colas emanadas del proceso Caron son de granulometría esencialmente fina, lo cual concuerda con lo obtenido por Ponce (1979).

Plantean también Rojas & Turro (2003), que por su composición química, las colas de la planta de recuperación de amoniaco son esencialmente ferrosas y alcanzan alrededor de un 68 % de Fe_2O_3 . También exhiben contenidos significativos de sílice (12 %), mientras que los óxidos de Mg, Cr y Al alcanzan como promedio 7,11; 5,03 y 3,45, respectivamente.

1.5. Perforaciones en las tuberías de acero

En las tuberías de hierro, especialmente en las de fundición antigua, sin tratamiento interior, se producen fuertes incrustaciones por adherencia o por precipitación del propio material. Asociados a las tuberías de hierro, ya sean de acero como de fundición, con revestimientos escasos y sin las protecciones adecuadas, aparecen los problemas de corrosión. Hay todo un tratado de la corrosión en tuberías de acero y fundición, ya sea por fallos del revestimiento, por corrosión superficial debida al ataque exterior, por corrosión interior en tuberías que se llenan y vacían periódicamente, por condensación en el ambiente. Otro tipo de ataque a los materiales férreos es mediante corrosión electrolítica debida a corrientes parásitas o vagabundas, o bien a diferente potencial de oxidación de los terrenos atravesados.

El desgaste de un material en un componente mecánico, puede variar de muy intenso a despreciable. Esto puede significar una notable pérdida de eficiencia y la inutilidad completa de la misma. Por eso es muy importante dejar establecida la necesidad de emplear la máxima rugosidad en el análisis y diagnósticos de los mecanismos de desgaste, Verdeja, (1996). En ciencia de materiales, el desgaste es la erosión de material sufrida por una superficie sólida por acción de otra superficie. La fatiga del material es un fenómeno producido por cargas cíclicas y

choques repentinos que actúan sobre las piezas en los regímenes de trabajo a que están sometidas. A consecuencia de la fatiga en el metal se forman micro grietas comenzando a fragmentarse, lo que puede provocar una avería por la rotura de piezas.

1.6. Generalidades de los aceros inoxidables austeníticos

Los aceros inoxidables austeníticos comprenden el grupo que contienen de 8 a 32 % Cr y Ni hasta el 68 %. Algunos grados contienen Mn hasta 18 %. Estos aceros no son endurecibles por tratamiento térmico, pero pueden serlo por trabajado en frío, aunque a elevadas temperaturas se pierde el efecto debido a la recristalización de la estructura. Dentro de los aceros inoxidables son los que poseen mayor resistencia mecánica a temperaturas mayores a 540°C. Dentro del rango de temperatura entre 500 y 900°C pueden ser susceptibles a la corrosión intergranular en ciertos ambientes acuosos y con una microestructura susceptible.

Estos aceros pueden agruparse en la siguiente forma:

- a)** Aleaciones de la serie 300. Son esencialmente del tipo Cr-Ni y Cr-Ni-Mo a los que se adicionan otros elementos aleantes en bajas cantidades.
- b)** Aleaciones 19-9 DL, 19-9 DX y 17-14 CuMo. Contienen de 9 a 14 % Ni, 1,25 a 2,5 % Mo y 0,3-0,55 % Ti, y algunos poseen el agregado de W, Nb y Cu.
- c)** Aleaciones Cr-Ni-Mn del tipo AISI 201-202, Nitronics 32, 33, 50, 60 y Carpenter 18-18 Plus. Contienen entre 5 a 18 % Mn y 0,1 a 0,5 % N. El rol del manganeso es sustituir al níquel y permitir mayor solubilidad de nitrógeno, el cual genera un gran endurecimiento por solución sólida y también resistencia a la corrosión por picado.

Los aceros inoxidables austeníticos del tipo b) y c) tienen muy alta resistencia mecánica con una altísima tenacidad, ductilidad y formabilidad. Exhiben resistencia a la corrosión considerablemente mejor que los martensíticos o los ferríticos y también poseen excelentes propiedades de resistencia mecánica y a la oxidación a temperaturas elevadas (hasta 1200°C según el tipo de acero). En

general, se utilizan en partes de hornos, tuberías de intercambiadores de calor, tuberías de vapor, turbinas de gas, entre otras utilidades.

Los grados H de los aceros inoxidables austeníticos se especifican para condiciones donde se requieren resistencia a la termofluencia y a la ruptura por termofluencia óptimas. Poseen contenidos de C de 0,04 a 0,1 % y son solubilizados a temperaturas lo suficientemente altas como para producir buenas propiedades de termofluencia. Los grados estabilizados (como 321H, 347H y 348H) poseen adiciones de fuertes formadores de carburos.

1.6.1. Aceros inoxidables fundidos

La producción de aceros inoxidables se hace con el proceso de fundición, en todos sus grados y de igual forma para modificaciones de aleaciones de usos especiales. Así, mientras que las piezas realizadas por laminado o forja, por general poseen una resistencia reducida, una ductilidad considerable a temperatura de trabajo en caliente y ductilidad suficiente para trabajo en frío, en algunos productos, el rango de utilización de las fundiciones de aceros inoxidables no está restringida por tales requerimientos.

La familia de los aceros inoxidables en su estructura de fundición se compone de dos series de aleaciones distintas. La primera serie corresponde a los grados forjados, utilizados por su alta resistencia a la corrosión a temperaturas por debajo de los 650°C, mientras la segunda serie corresponde a composiciones modificadas para proveer una alta resistencia mecánica a temperaturas elevadas de 650°C a 1200°C.

Los aceros inoxidables fundidos están relacionados composicionalmente con los laminados, siendo la mayor diferencia el contenido de carbono. En los aceros inoxidables resistentes a altas temperaturas (fundidos), el contenido de carbono varía de 0,3 a 0,6 %, mientras que en los laminados, típicamente entre 0,01 a 0,25 %. Esta diferencia resulta en cambios significativos en las propiedades.

Estos aceros se designan por la Sociedad Americana de Fundidores de Aceros. La letra H indica que el acero será utilizado principalmente para servicios a altas

temperaturas. La segunda letra denota el tipo nominal Cr-Ni de la aleación y los números que siguen a las dos primeras letras indican el porcentaje máximo de carbono. Otra manera de clasificarlos es por el orden en que los aleantes están en mayor proporción: Aceros Fe-Cr, Fe-Cr-Ni y Fe-Ni-Cr.

Los del tipo Fe-Cr-Ni contienen entre 18 y 32 % Cr y de 8 a 22 % Ni. Son básicamente austeníticas y se utilizan bajo condiciones de oxidación o reducción equivalentes a las aleaciones Fe-Cr, pero poseen mayor resistencia mecánica y ductilidad. En consecuencia, estas aleaciones se utilizan para resistir mayores cargas y cambios moderados de temperatura. También resisten a la presencia de gases oxidantes o reductores con alto contenido de azufre (S). Su resistencia a la termofluencia y a la ruptura aumenta con el contenido de níquel. Dentro de este grupo se encuentran los grados HE, HF, HH, HI, HK y HL. Excepto el grado HE y HH tipo I que tienen una estructura ferrítica-austenítica, en el resto de las aleaciones si la composición química no está bien balanceada puede presentar una estructura parcialmente ferrítica junto con la austenítica. Si esto sucede y el material es sometido a largas exposiciones en el rango de temperaturas entre 760 y 815°C, la ferrita presente transformará a la fase σ que genera fragilización a temperatura ambiente.

El grado HK (26 % Cr-20 % Ni) es un material totalmente austenítico con características generales y propiedades mecánicas similares al HH. Aunque es menos resistente a los gases oxidantes que los tipos HC, HE y HI contiene suficiente Cr para asegurar una buena resistencia a la corrosión en medios de gases calientes, inclusive gases conteniendo azufre (S) en condiciones oxidantes o reductoras. El alto contenido de Ni hace a esta aleación una de las más resistentes al calor a temperaturas superiores a los 1040°C. Presenta una estructura de austenita estable en todo el rango de temperaturas de servicio. Cuando se obtiene por fundición, presenta una matriz austenítica conteniendo carburos relativamente grandes en forma de red o islas dispersas. Después de la exposición a la temperatura de servicio precipitan finos carburos dentro de los granos de austenita que contribuyen al aumento de la resistencia a la

termofluencia. También las aleaciones HK suelen presentar un constituyente laminar presumiblemente de carburos o carbonitruros en forma de plaquetas dentro de la austenita. Puede producirse la transformación directa de la austenita a σ en el rango de temperatura entre 760 y 870°C, particularmente en aquellos casos con bajos contenidos de C (0,20 a 0,30%). El contenido de carbono determina el valor mínimo de la resistencia a la termofluencia y la vida promedio a rotura. Bajo las mismas condiciones de carga y temperatura, aquellas aleaciones con mayores contenidos de C presentan menores velocidades de termofluencia y mayor vida promedio a la ruptura que aquellas con menos C. También afecta a las propiedades a temperatura ambiente después de un envejecido a alta temperatura: a mayor porcentaje de C, menor ductilidad residual.

1.7. Aleaciones resistentes a la corrosión y altas temperaturas

Las aleaciones hierro-cromo son inoxidables y particularmente en medios altamente oxidantes, su resistencia a la corrosión aumenta con el contenido de cromo. Aquellos con niveles más bajos de cromo son endurecibles por transformación de Austenita a Martensita y pueden dar un rango amplio de propiedades mecánicas. A más altos contenidos de cromo son ferríticos en todas las temperaturas hasta el punto de fusión y no puede ser endurecida por tratamiento térmico. Aunque los contenidos de níquel son aumentados para mejorar la resistencia de las aleaciones a solución oxidantes de cloruro y neutras. El incremento de molibdeno en las aleaciones aumenta su resistencia al picado en medios que contienen cloruros.

Las aleaciones que contienen cantidades de níquel, tienen microestructuras totalmente austeníticas o una combinación de austenita y ferrita. Al igual que las aleaciones ferríticas no endurecibles, las clases austeníticas, no pueden ser endurecidas por el proceso de transformación austenita-martensita. Los cinco tipos de microestructuras fundidas resistentes a la corrosión son la martensítica, la ferrítica, la endurecida por precipitación, la austeníticas-ferríticas y la austenítica.

Hay tres clases de aleaciones resistentes al calor, con sus respectivas características generales. Unas contienen de 8 a 30 % de cromo y poco níquel. Tienen baja resistencia a temperaturas elevadas, pero excelente resistencia a la oxidación y son usadas bajo condiciones oxidantes y en cargas estáticas bajas a temperatura constante. Otras contienen más de 19 % de cromo y más del 9 % de níquel y son utilizadas bajo condiciones oxidantes para resistir cargas moderadas a temperaturas medias. Mientras que otras contienen más del 10 % de cromo y más del 23 % de níquel. En estas, el contenido de níquel más que el de cromo, es para usarse como protectores en condiciones oxidantes, para resistir gradientes de temperaturas severas, tales como en partes que están a temperaturas constantes en servicio.

Las fundiciones resistentes al calor tienen la propiedad de resistir ataques corrosivos de gases calientes, por lo que con la adherencia, de capas protectoras de Cr_2O_3 , disminuyen la velocidad de corrosión con el tiempo.

1.8. Características de los aceros aleados al cromo

Las fundiciones aleadas son aquellas que contienen uno o más elementos de aleación en cantidades suficientes para mejorar las propiedades físicas (resistencia a la corrosión, al desgaste o al calor) o mecánicas de las fundiciones ordinarias. Los elementos que normalmente se encuentran en las primeras materias, como el silicio, manganeso, fósforo y azufre no se consideran como elementos de aleación. La mayoría de los elementos de aleación adicionados a las fundiciones aceleran o retardan la grafitización, y ésta es una de las principales razones de su empleo. Los elementos de aleación más utilizados son el cromo, cobre, molibdeno, níquel y vanadio.

El cromo es uno de los elementos especiales más empleados para la fabricación de materiales aleados. Se suele emplear en cantidades diversas, desde 0,3 a 30 %, según los casos, aumenta la dureza y la resistencia de los aceros, mejora la templabilidad, disminuye las deformaciones en el temple, aumenta la resistencia al desgaste y la inoxidableidad (Smith, 1998).

En presencia de una cantidad suficiente de carbono, el cromo tiende a formar carburos y en cambio, cuando el acero es de muy bajo contenido en carbono, es soluble en la ferrita. Los carburos formados por este elemento no son siempre carburos simples; con bastante frecuencia se presentan asociados con el carburo de hierro y a veces, forman carburos complejos de dos o más elementos. La naturaleza de estos compuestos depende del porcentaje de carbono y del contenido en elementos de aleación, los carburos que forman los diferentes elementos de aleación son duros y frágiles, y en especial los de cromo y vanadio son más duros y resistentes al desgaste que los demás (Apraiz, 1975).

El cromo, desde un 5 % en peso, aumenta la resistencia a la oxidación del hierro en atmósfera seca, por eso para un satisfactorio comportamiento en atmósferas oxidantes, a temperaturas de hasta 750°C, los aceros utilizados suelen ser de alto contenido en cromo. Simultáneamente, contenidos crecientes de cromo en solución sólida en el hierro, disminuyen la conductividad térmica de él y por tanto le confieren refractariedad (Belzunce, 2001; Bedolla-Jacuinde et al., 2003).

Callister (1999) y Dogan *et al.*, (1997), plantean que la presencia del cromo en el acero, además de formar una película superficial de su óxido, modifica la posición del hierro en la serie electroquímica, así el hierro, que sin cromo es anódico, pasa a comportarse catódicamente en medios acuosos cuando el porcentaje de cromo es superior al 12 % en peso. Los aceros con más de 12 % de cromo reciben el nombre de aceros inoxidables, la resistencia a la corrosión resultará tanto peor cuando mayor sea el contenido de carbono debido a la presencia de carburos de cromo. En las zonas contiguas a estos carburos, disminuye el contenido de cromo (porcentajes inferiores al 12 %) formándose aureolas descromadas que pasan a ser anódica y son atacadas.

Otra cualidad interesante del cromo es su efecto sobre las temperaturas críticas de transformación del hierro, amplía la estabilidad del hierro delta y también incrementa la temperatura de transformación del hierro γ en hierro α , es decir, tiene un carácter alfégeno (Khanna, 2002).

Según Pero-Sanz (2000) el cromo tiene cierta incidencia en la templabilidad de la austenita, la hace más estable a las transformaciones durante el enfriamiento continuo, disminuyendo su temperatura de inicio de formación en martensita. Los aceros con altas proporciones de cromo, a pesar de ser enfriados lentamente, puede no tener lugar la transformación perlítica de la austenita, que requeriría descensos de temperatura aún más lentos y aquella austenita se transformará parcialmente en martensita y quedará, a temperatura ambiente, una cierta proporción de austenita residual sin transformar.

Según Tabrett (2000) son los carburos eutécticos presentes en su microestructura los responsables de esta buena resistencia que además mejora al aumentar su porcentaje, sin embargo, estos carburos influyen críticamente en el comportamiento a fractura y la tenacidad del material disminuye a medida que la fracción de carburos aumenta. La matriz austenítica, martensítica o mezcla de las dos actúa de soporte de los carburos, previniendo la fractura y el desconche de los mismos.

Verdeja (1994); Pero-Sanz (2000); Dogan y Hauk (1997), consideran que el cromo aumenta además la templabilidad, la resistencia a elevadas temperaturas, así como las temperaturas de temple, recocido y normalizado, disminuye ligeramente la tendencia al sobrecalentamiento y la ductilidad no siendo así para contenidos superiores al 1,5 %. Según Durman (1970), en los aceros de baja aleación, en presencia de Ni y Mo, aumenta la templabilidad, este elemento forma un óxido de alta temperatura de fusión y de difícil eliminación, reduce la velocidad de temple, disminuye el crecimiento del grano y retarda la descarburación periférica, dando mayor profundidad de temple.

La austenización de las fundiciones al cromo es crítica para la obtención de microestructuras endurecidas con alta dureza final, pero se sabe que existe un rango de temperaturas para el cual estas fundiciones alcanzan la máxima dureza. Dicha temperatura es la que ocasiona la óptima disolución de los carburos de aleación en la austenita sin que se genere una fracción excesiva de austenita retenida. Suele estar en los 1025°C, dependiendo del contenido en cromo de la

fundición (Tabrett, 1996). La dureza y microdureza tras los tratamientos de temple se ven modificadas en el curso de los dos tratamientos posteriores de revenido.

1.9. Defectos de los aceros aleados al cromo

Las altas propiedades mecánicas de los aceros aleados les han asegurado un empleo predominante, en comparación con los aceros al carbono, en muchas ramas de la construcción de maquinaria especial (aviación, industria del automóvil y otras). Al mismo tiempo, en los aceros aleados se presentan con más frecuencia diversos defectos, que se dan también en los aceros al carbono, pero no tan a menudo.

Suele ocurrir que aun observando rigurosamente los regímenes tecnológicos, correctamente establecidos, no se consigue eliminar totalmente estos defectos. Los más importantes de ellos son la fragilidad de revenido, la segregación dendrítica y los copos (flocken). La existencia de elementos de aleación en el acero aumenta el intervalo de temperatura de cristalización, dificulta el transcurso de los procesos de difusión y favorece el desarrollo de los fenómenos de segregación dendrítica, puesto que aumenta la diferencia de concentración entre los cristales que precipitan del líquido antes y después (según los datos de I. N. Golikov).

Después del laminado o la forja se obtienen fibras que se extienden en el sentido de la deformación. Algunas propiedades mecánicas resultan ser más bajas en dirección transversal a la fibra que a lo largo de ella lo que se debe a la existencia de inclusiones no metálicas deformadas a lo largo del laminado. Este fenómeno recibe el nombre de anisotropía de las propiedades mecánicas.

Para disminuir la segregación dendrítica se recurre al recocido de difusión de los lingotes antes de laminarlos. Este recocido consiste en el calentamiento prolongado del acero a temperaturas bastante altas (1 000-1 200°C). Los copos (flocken), en la fractura, son una especie de manchas y en la probeta metalográfica transversal, fisuras en el acero (fractura). Como es natural, la existencia de grietas provoca el descenso de las propiedades mecánicas. Las

fisuras-copos son tanto más peligrosas, cuanto más alta es la resistencia del acero. En los aceros de alta calidad, los copos son un defecto muy serio. Copos puede haber, en todos los aceros, pero donde se encuentran con más frecuencia es en los aceros que contienen cromo, es decir, en los aceros al cromo, al cromo-níquel, al cromo-níquel-volframio, al cromo-manganeso y otros.

Copos puede haber en el acero forjado o laminado; en el acero fundido se encuentran raras veces. Si el acero después de forjado (o laminado) se enfría rápidamente en la región de temperaturas de 200°C y más abajo, en los aceros propensos a la formación de copos, se forman éstos. La velocidad de enfriamiento a temperaturas superiores a 200°C no ocasiona la formación de copos. Así, pues, éstos se originan durante el enfriamiento rápido desde 200 hasta 20°C.

Una serie de datos demuestran que los copos los forma el hidrógeno que hay disuelto en el acero líquido, el cual, a temperaturas inferiores a 200 °C, se separa de la solución y crea fuertes tensiones internas que ocasionan la formación de grietas (copos). Si el acero se enfría lentamente, el hidrógeno tiene tiempo de separarse de la solución difundiéndose y de salir por completo del acero. Como resultado de esto, el acero deja de ser propenso a la formación de copos (S. S. Shteinberg, E. Houdremont).

De este modo, una de las causas principales de que se formen los copos puede considerarse que es el hidrógeno que hay disuelto en el acero, el cual no tiene tiempo de separarse a temperaturas menores de 200°C. Los copos no suelen formarse en el acero fundido, porque el hidrógeno que se separa de la solución se concentra en los numerosos poros de fundición y en las faltas de compacidad del metal fundido.

Los copos pueden eliminarse forjando (o laminado) otra vez el metal para obtener una dimensión menor, ya que en este caso se sueldan las grietas (copos).

En las secciones pequeñas (menores de 25-30 mm de diámetro) raras veces se encuentran copos. La rarefacción, la supresión de gases, incluyendo el hidrógeno del acero, elimina la capacidad del mismo de formar copos. Las secciones

superiores a los 30 mm de diámetro el riesgo de presentar grietas es mayor, siendo el caso de la tubería de descarga de la cola destilada en la empresa ECG de Moa.

1.10. Influencia de los elementos de aleación en los aceros inoxidable

Por definición, acero es una composición de hierro y carbón. El acero puede ser aleado con otros elementos para mejorar sus características físicas y mecánicas, para producir propiedades especiales como resistencia a la corrosión, la abrasión, al calor y para incrementar su tenacidad (resistencia al golpe y choque). En esto desempeña un papel fundamental el cromo, el níquel, el carbono y manganeso como los elementos principales presentes en el acero HK-40, los cuales influyen en las propiedades del mismo.

Uno de los principales efectos a tener en cuenta es el de fragilidad por fase sigma. Esta tiene una estructura cristalina tetragonal compleja, la cual refleja un rango de orden en algunas aleaciones con ciertos sitios cristalográficos. La fase sigma se forma en la de transición de la aleación y es muy importante porque estos efectos deterioran las propiedades mecánicas y la resistencia a la corrosión.

En aceros inoxidable ferríticos con pequeñas cantidades de otros elementos y particularmente los estabilizadores de ferrita, agrandan ampliamente el efecto del cromo y forman fase sigma. Muchos de los aceros inoxidable austeníticos más comunes, que tengan más del 17 % de cromo pueden desarrollar esta fase. En estos aceros, los cuales contienen austenita y ferrita, la formación de la fase sigma, ocurre dentro de la ferrita.

En los aceros completamente austeníticos, tales como el tipo 310 (HK-40), forman fase sigma directamente desde la austenita usualmente a lo largo de los límites de grano.

Otro efecto de suma importancia es la fragilidad causada por el propio contenido de cromo en los aceros inoxidable que contienen más o alrededor de 15 % de cromo, en el rango de temperaturas de 370-540°C, con una fragilidad máxima a

475°C. Se está propenso al aumento de la fragilidad con el aumento de cromo y el tiempo de exposición a la temperatura.

La fragilidad de esta especie esta condicionada por la formación de un cubo centrado en el cuerpo compuesto de hierro y cromo que contienen de 70-80 % de cromo. Las temperaturas a la cual ocurre la fragilidad es entre 605°C y 790°C y es debido a la precipitación de fase sigma; esto puede ser notado en el cambio de ductilidad; resistencia al impacto y resistencia a la torsión, representando un rango de fragilidad, que puede ser observado para un acero de 27 % de cromo después de 1 hora a 475°C, mientras que la fragilidad severa existe después de 50 horas.

No obstante, el cromo aumenta la resistencia a la tracción, aumenta la dureza y la tenacidad y da resistencia a la abrasión y al desgaste. Produce resistencia a la corrosión y a la oxidación.

El níquel amplía el campo de estabilidad de la austenita, puesto que es un elemento estabilizador de este microconstituyente. Rebaja la temperatura a la que ocurre la transformación ferrita-austenita de tal manera que la aleación hierro-níquel con 25 % de níquel presenta estructura austenítica a temperatura ambiente.

El alto contenido de Ni hace a esta aleación una de las más resistentes al calor a temperaturas superiores a los 1040°C. Presenta una estructura austenítica estable en todo el rango a temperaturas de servicio. Después de la exposición a la temperatura de servicio precipitan finos carburos dentro de los granos de austenita que contribuyen al aumento de la resistencia a la termofluencia. Suele presentar un constituyente laminar presumiblemente de carburos o carbonitruros en forma de plaquetas dentro de la austenita.

Por su parte, el carbono no se considera normalmente como elemento de aleación, sin embargo es el componente de más importancia en el acero, aumenta la resistencia a la tracción, aumenta la dureza y da resistencia a la abrasión y al desgaste.

El manganeso es el elemento que se agrega en la fabricación para desoxidar y degasificar el acero. Se combina con azufre para dar mayor facilidad de

maquinado. Aumenta la resistencia a la tracción, aumenta la dureza y la resistencia contra la abrasión y desgaste. Disminuye la tendencia de inestabilidad y aumenta la facilidad de cementado. Se utiliza en cualquier acero para desoxidarlo es decir, para eliminar las impurezas perniciosas de óxido de hierro, elimina también los compuestos sulfurosos del hierro y se disuelve en la ferrita y en la cementita. Influye sensiblemente en las propiedades del acero elevando su resistencia en las piezas laminadas en caliente y variando algunas otras propiedades.

El silicio es un elemento estabilizador de la ferrita, puesto que favorece su formación y por consiguiente la formación de la fase sigma en los aceros ferríticos con 25 a 30 % de cromo, y en los austeníticos con cromo superior a 19 %. Amplia los intervalos de composición y temperatura en que resulta estable la fase sigma. Para formar la fase sigma a 600°C en las aleaciones hierro-cromo, el contenido del cromo deberá ser superior al 30 %. En los aceros con 10 % de silicio y 14 % de cromo se consigue precipitar fase sigma a 600°C. Además, favorece la formación de estructuras bifásicas (ferrita y austenita) y aumenta la resistencia en caliente.

Se ha demostrado con métodos modernos de investigación, que el fósforo que hay en la solución de acero enriquece los límites de los granos. Al disolverse en la ferrita el fósforo eleva bruscamente la temperatura de transición al estado frágil, es decir, que provoca fragilidad en frío del acero. Con un 0,05 % de fósforo, el hierro a la temperatura ambiente es frágil. Conviene advertir que, en determinados casos, el fósforo es conveniente, así por ejemplo, facilita la mecanización con herramientas de corte y en presencia del cobre eleva la resistencia a la corrosión.

1.10.1. Influencia del cromo en la microestructura de los aceros inoxidables

En la aleación HK-40, la inoxidabilidad o pasividad es propiciada por la adición del cromo. Otros elementos de aleación, refuerzan el efecto del cromo en distintos

medios e ofrecen otras propiedades especiales las cuales pueden ser establecidas entre las características de los aceros inoxidables.

La influencia del cromo en la estructura de hierro es mostrada en el diagrama binario hierro-cromo de la figura 1.1.

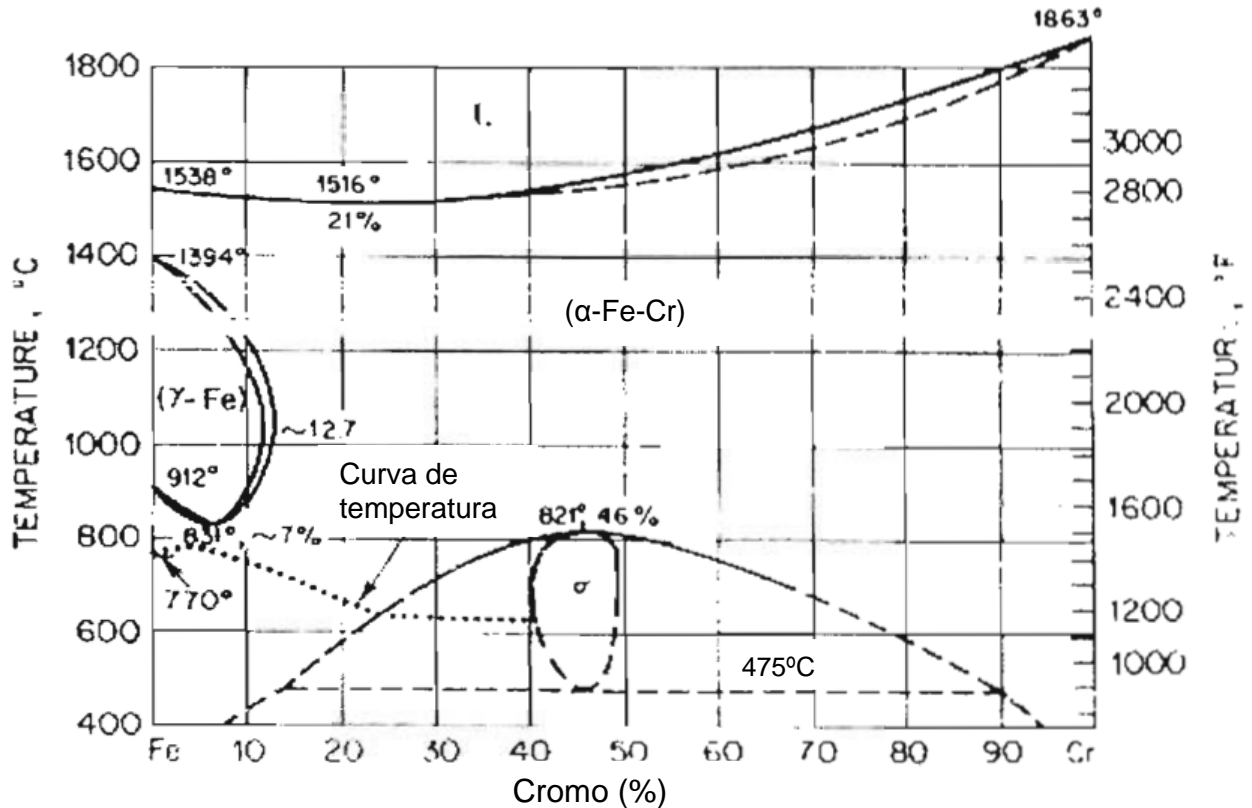


Figura 1.1. Influencia del cromo en la estructura de hierro.

Se puede observar que al incrementar el cromo se reduce la presencia de la austenita, la cual existe hasta aproximadamente 12 % de cromo, la ferrita es estable a todas las temperaturas después del 12 % de cromo. En el sistema hierro-cromo, la austenita no existe por encima de 1390°C o por debajo de 830°C. Aunque el hierro con exceso del 12 % de Cr es ferrítico a todas las temperaturas, los aceros inoxidables ferríticos comerciales contienen arriba del 27 % de Cr, pueden contener algo de ferrita a temperaturas elevadas a causa de la presencia del carbono y nitrógeno en pequeñas cantidades.

1.11. Conclusiones del Capítulo I

- Desde el punto de vista reológico, las colas lateríticas se comportan como un fluido plástico. En ellas predominan las fases minerales maghemita y magnetita, con un tamaño de partícula mayoritario de 43 micrones, lo que favorece un comportamiento polidisperso.
- Los aceros inoxidable austeníticos comprenden el grupo que contienen de 8 a 32 % Cr y Ni hasta el 68 %. Lo que les permite tener buena resistencia mecánica a temperaturas superiores a 540°C.
- En las literaturas consultadas, se pudo establecer que para un satisfactorio comportamiento en atmósferas oxidantes, a temperaturas de hasta 750°C, los aceros utilizados suelen ser de alto contenido en cromo. Simultáneamente, contenidos crecientes de cromo en solución sólida en el hierro, disminuyen la conductividad térmica del y por tanto le confieren refractariedad.

CAPÍTULO 2.
MATERIALES Y MÉTODOS

CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Introducción

Toda investigación necesita de herramientas para obtener buenos resultados. Una selección correcta de los materiales y métodos empleados validan los resultados obtenidos. En el presente capítulo se abordan los cálculos correspondientes a la evaluación físico-metalúrgica del acero HK-40.

Por tal motivo, el **objetivo** de este capítulo es establecer los métodos, procedimientos y condiciones de ensayos para determinar el comportamiento físico-metalúrgico de la aleación objeto de estudio.

2.2. Proceso de obtención de las muestras

Para la obtención de las muestras a analizar se realiza la fusión de la aleación en un horno de inducción con crisol de alta frecuencia, con capacidad de 1 t. Los materiales de carga seleccionados de acuerdo a la composición química correspondiente a la aleación objeto de estudio, se relacionan en la tabla 2.1. Se evidencia que los mismos son tratados limpios de grasa y suciedad y con dimensiones tales que no dañen el revestimiento del horno, por lo que se comprueba su masa en una balanza digital de pesaje industrial.

Tabla 2.1. Materiales de carga

Materiales de carga	Masa (kg)
Palanquilla	36,76
Fe Cr 0.06	40
Ni-Sinter	21,74
Fe Si 75	0,5
Fe Mn 1.5	0,6
Carbón Antrasita	0,4

El balance de metales (carga metálica), se efectúa en base a 100 kg. Luego para convertirla a la capacidad de trabajo del horno se multiplican los valores por 10 y se conforma la carga para una tonelada de metal líquido, que es la capacidad de trabajo del horno (1 tonelada).

Para el caso actual, se escoge el método de moldeo químico. Este es obtenido a partir de resinas de tipo Fenol-Formaldehído o urea formaldehído, modificadas con alcohol furfurílico (Salcines, 1985). La mezcla que se forma con los tres componentes (Arena, Resina y catalizador) endurece pasado un breve tiempo a temperatura ambiente, lográndose altos valores de resistencia en el molde (1-10 kgf/cm²). Los catalizadores tienen la importante función de acelerar las velocidades de polimerización.

Se controla la temperatura de vaciado de la aleación a 1 600°C, mientras que la de vertido en 1 550-1 580°C, puesto que las temperaturas muy elevadas generan contracción en el proceso de solidificación y los puntos calientes surgidos pueden producir micro rechupes y estructura dendrítica grosera, arrastre de arena y sinterización de la arena.

2.3. Condiciones experimentales y preparación de probetas

Con el fin de verificar la hipótesis planteada se desarrolla un plan experimental. Una vez realizada la fundición de la tubería por el método de colada en moldes de resina furánica autofraguante, se toman tres muestras de la aleación para el desarrollo de los experimentos. Esta cantidad resulta significativa para comprobar los resultados, puesto que con una muestra se pueden obtener errores propios de los equipos, pero cuando se ensayan tres o más especímenes, los resultados se toman como admisibles (Calero, 1976).

Con cada una de las muestras se preparan mecánicamente tres probetas, con lo que es posible validar la hipótesis planteada, aplicando ensayos de composición química, metalografía, definir el porcentaje de microconstituyentes, además de comprobar la dureza y la microdureza.

La máquina de corte empleada para la preparación de las probetas es de tipo CM 260, marca *echo RD*. La misma tiene cinco chorros de líquido refrigerante que garantizan una buena lubricación para evitar calentamiento y por consiguiente transformaciones microestructurales en las superficies de contacto. Es de suma importancia que las probetas sean limpiadas en todo su contorno, además de

garantizar que tengan superficies planas con la menor cantidad de deformaciones posibles. Antes de someter los elementos tratados a los procesos de desbaste y pulido, es necesario montar las muestras en un soporte (encapsulado) que garantice estabilidad durante los ensayos y por consiguiente un mejor manejo de estas (ver figura 2.1). Con esto se consigue un mayor control de los resultados.



Figura 2.1. Muestra encapsulada.

Esta operación se realiza por medio de una máquina de encapsular de marca *echo RD*, de tipo MP 350 A. Para esto se emplea resina fenólica negra con una temperatura de fusión de 150-170°C durante un tiempo de 6-8 minutos, para luego enfriarse en el molde hasta los 60°C.

2.4. Ensayo de la composición química de la aleación

El acero HK-40 es una aleación correspondiente a la norma americana *American Iron and Steel Institute* (AISI), según Ortiz-Mariscal *et al.* 2015. La H denota su resistencia a elevadas temperaturas (heat resistant), la K se debe al contenido de cromo con base en el diagrama ternario Fe-C-Cr y el 40 se refiere a la cantidad de carbono presente en la aleación. En la tabla 2.2, se muestra la composición química establecida para esta aleación según designa la norma antes mencionada.

El análisis de la composición química para verificarlas con los estándares y establecer su correspondencia, se realiza con un espectrómetro cuántico de masa con atmósfera de argón, del tipo OBLF, marca Gs 1000-II, ubicado en el

Laboratorio de Análisis Químico del Taller 08 (Fundición) de la Empresa Mecánica del Níquel (EMNi) de Moa “Comandante Gustavo Machín Hoed de Beche”. Se ensayan las muestras de la aleación, para lo que se someten a tres momentos de chispas y se obtiene un promedio individual de los diferentes elementos que integran la aleación.

Tabla 2.2. Composición química estándar de la aleación HK-40, en %. Fuente: Luis, (2005)

C	Mn	Si	Cr	Ni
0,3-0,65	0,5-1,5	1,6	24-26	19-21

Antes de verificar los componentes de aleación de las muestras, estas se limpian de óxidos y grasas en una muela abrasiva y luego sobre una lija rotatoria.

2.5. Preparación metalográfica de las muestras

Para lograr un adecuado acabado superficial de las muestras, que permita observar la microestructura presente, el desbaste y pulido se realiza bajo la norma ASTM E3-11, por medio de una pulidora metalográfica *echo LAB*, de tipo PM 52 D. Se emplea un disco giratorio cubierto con papeles abrasivos de diversas granulometrías, yendo de la más gruesa a la más fina (180, 240, 600, 800 y 1200). Encima del disco se colocan las probetas y se alterna su sentido en 90°, para eliminar la capa de material distorsionado. Se tiene en cuenta no aplicar una fuerza excesiva, para evitar introducir defectos por deformaciones, rayas, arranques de material, elementos extraños, bordes redondeados o daños térmicos.

Las muestras son pulidas hasta lograr un brillo espejo en la superficie, con lo que se deben obtener resultados confiables en la observación de la estructura interna. Con este fin, se realizan las operaciones que permiten lograr la calidad superficial deseada, usando los siguientes pasos: desbaste, pulido, desengrasado, lavado y ataque químico.

2.5.1. Ataque químico de las muestras

El ataque químico se realiza por medio de técnica manual por inmersión durante 15 segundos aproximadamente. Una vez atacadas, se limpian nuevamente con agua destilada, se sumergen en alcohol etílico durante unos segundos y finalmente se secan, lo que elimina las impurezas y la humedad.

El reactivo a utilizar es el Nital, con 5 mL de ácido nítrico y 95 mL de alcohol etílico, recomendado por ASM Handbook (1992), aceros aleados y fundición gris. Esta sustancia oscurece la perlita y da contraste entre sus colonias por lo que revela sus fronteras, además diferencia la ferrita de la martensita y aumenta la rapidez del ataque.

Para el acabado final del proceso, se utiliza un paño de fieltro grueso y se utiliza polvo de diamante como sustancia abrasiva. Una vez pulidas las probetas, se lavan con agua destilada, se secan con papel de filtro y finalmente se vuelven a lavar con etanol para evitar cualquier vestigio de grasa y pastas de pulir.

2.6. Examen microestructural y del porcentaje de microconstituyentes

El examen de comprobación de la estructura interna, aporta información importante sobre la constitución del material en estudio, a través de determinar características tales como forma, tamaño y distribución de los granos, inclusiones, estructura metalográfica, además de sugerir los diversos procesos térmicos y mecánicos por los que ha transitado el material analizado.

Por esta razón, para comprobar la estructura metalográfica de la aleación estudiada, se realiza el examen de microscopía a través de un microscopio óptico binocular de marca echo LAB, empleando aumentos de 200X, como se muestra en la figura 2.2. El microscopio óptico está ubicado en el laboratorio de Materiales de la empresa “Comandante Gustavo Machín Hoed de Beche”, de Moa, está dotado de una cámara instalada mediante el hardware que refleja la imagen metalográfica en el computador.

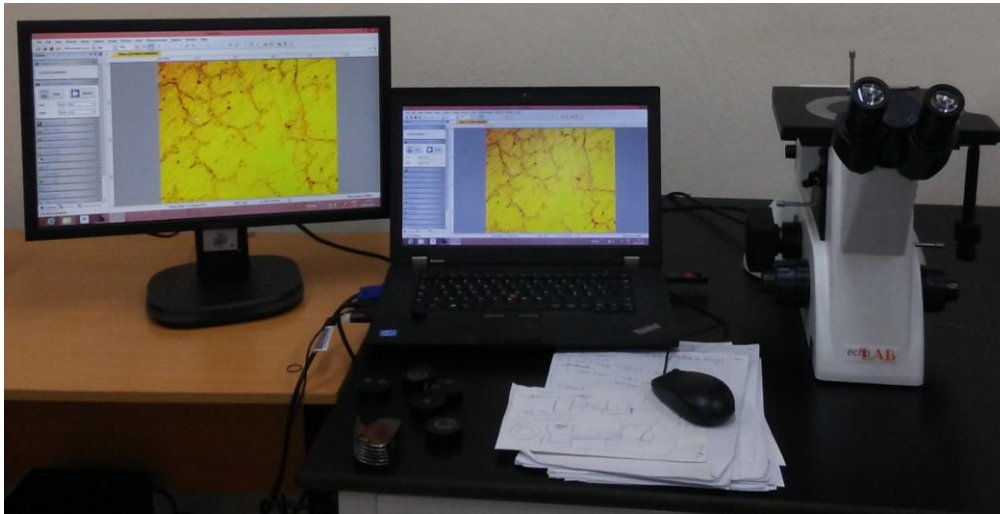


Figura 2.2. Microscópio óptico binocular con cámara instalada.

Para el análisis microestructural, en la presente investigación se toma como referencia una imagen metalográfica (muestra patrón) de un acero refractario HK-40, con el objetivo de establecer similitudes entre esta y la estructura interna obtenida en el ensayo correspondiente (ver figura 2.3). En esta se puede observar una matriz austenítica con precipitados de carburos del tipo $M_{23}C_6$, austenita (Fey), M_3C . También en los límites de grano se observa la precipitación de carburos $M_{23}C_6$.

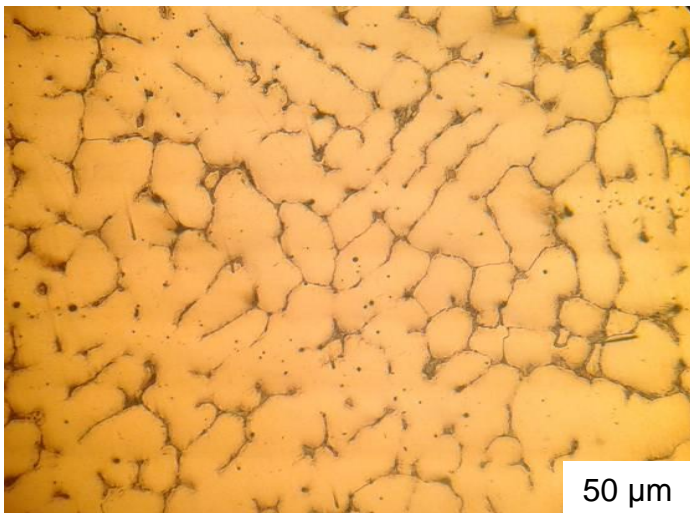


Figura 2.3. Muestra patrón del acero refractario HK-40. Fuente: Ortiz-Mariscal *et al.* 2015.

Con la ayuda de un software de análisis de microestructuras instalado al microscopio óptico, se determina el porcentaje de microconstituyentes. Este tipo de microscopio funciona básicamente por medio de la combinación entre el sistema óptico y la iluminación. En este ensayo los granos van a presentar colores diferentes, lo que indica que poseen una estructura interna distinta. Los átomos en los límites de grano son más reactivos durante el ataque químico y se disuelven en mayor cantidad que el grano mismo, por ello la reflexividad cambia y se acrecienta su visibilidad.

2.7. Evaluación de la dureza

Cuando se estudian aleaciones metálicas, es muy importante el empleo de métodos de evaluación que permitan conocer en breve tiempo algunas de las características más importantes de las aleaciones.

La verificación de la dureza superficial es uno de los ensayos no destructivos más conocidos y utilizados. Con el uso de este método se caracterizan piezas ya elaboradas de forma rápida, siendo este aspecto uno de los parámetros que más influye en el comportamiento de los materiales. Se admite que es el más relevante en cuanto a la influencia en la resistencia al desgaste abrasivo, adhesivo y a la fatiga por contacto superficial (Alcántara *et al*, 2009).

Se entiende por dureza de un material, la medida en la que este se resiste a ser penetrado o a la deformación permanente (plástica) en su superficie. Esta propiedad se mide a través de métodos validados, como las técnicas de ensayos no destructivos de dureza y microdureza, que son ideales para estimar comportamientos mecánicos en las aleaciones (Gresesqui, 2018).

Para la investigación actual, los ensayos de dureza se realizan en cinco puntos de la cara superficial de las probetas según el ejemplo mostrado en la figura 2.4, con el empleo de un durómetro digital modelo HRS-ISO (Digital Rockwell Hardness Tester), especialmente diseñado para medir dureza superficial en aleaciones metálicas. Utiliza como penetrador un cono de diamante con un ángulo de 136° y

expresa los valores en HRC. La carga aplicada es de 1471 N en un tiempo de 15 segundos.

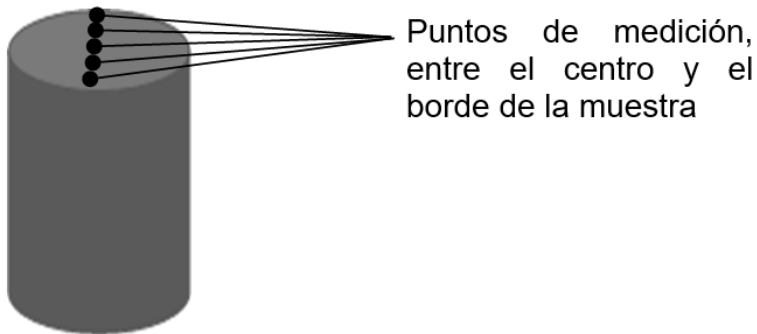


Figura 2.4. Zonas para la medición de dureza y microestructural.

La superficie de la probeta se prepara de la misma manera que para el análisis microestructural (desbaste y pulido), para lograr que esta quede lisa, seca, libre de grasa, polvo y en posición horizontal, evitando desplazamientos del indentador y por tanto resultados erróneos.

Cuando se conocen los valores de la dureza obtenidos en cada una de las mediciones, se calcula el promedio (Media) de estas de forma individual a través de la expresión 2.1, estando al tanto de la cantidad de huellas realizadas en el experimento.

$$Media = \frac{\sum X_i}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n HRC_i}{n} \quad 2.1$$

Aquí, X_i es el valor de i medición; HRC representa el valor de dureza en kgf/mm^2 y n el número de mediciones realizadas.

2.8. Ensayo de microdureza

Por medio del ensayo de dureza Vickers (HV) o microdureza realizado al acero, se determina la resistencia de los volúmenes microscópicamente pequeños de la aleación. Para el ensayo se utilizó un microdurómetro modelo echoLAB, del laboratorio de ensayos ubicado en el laboratorio de Materiales de la empresa “Comandante Gustavo Machín Hoed de Beche”, de Moa. La superficie se prepara

realizando el desbaste y el pulido de la probeta, para lograr que esta quede lisa, seca, libre de grasa, polvo y en posición horizontal.

El número de dureza HV se determinó midiendo el tamaño de las huellas dejadas luego de la indentación.

Para obtener la dureza Vickers de la superficie se presiona contra la probeta el indentador piramidal de diamante con ángulo entre sus caras $\alpha = 136^\circ$. La pirámide se mantiene por un tiempo de 15 segundos bajo la carga P de 50 g. Luego de retirada la carga se miden las dos diagonales de la impronta dejada, con ayuda de un microscopio. El valor medio de las diagonales (d) y el valor de la carga se sustituyen en la fórmula de trabajo para obtener el valor de la dureza Vickers. En las mismas condiciones se realizan varias indentaciones más. En la figura 2.6 se muestra el microdurómetro usado para la medición.



Figura 2.5. Zonas para la medición de dureza y microestructural.

La indentación se realizó en la superficie con el objetivo de analizar la dureza en las microestructuras presentes.

La dureza (VH) se calculó por las ecuaciones 2.2, 2.3 y 2.4.

$$VHN = 18544 \cdot \frac{P}{d^2} \quad 2.2$$

Donde:

VHN - número de dureza Vickers; kgf/mm²

18544 - constante

P - peso; kgf

\bar{d} - diámetro medio; mm

$$\bar{d} = \frac{(d_1 + d_2)}{2} \quad 2.3$$

$$\text{Microdureza promedio: } \overline{VHN} = \frac{\sum VHN_1 + VHN_2}{2} \quad 2.4$$

Este ensayo se basa en el principio de calcular el valor de dureza relacionando la fuerza de aplicación sobre la superficie de la impresión en el material. Lo hemos simplificado utilizando en este caso el valor de la longitud de la diagonal.

2.9. Conclusiones del capítulo 2

- Se estableció que la aleación se obtiene por el método de fundición en moldes de resina furánica autofraguante, controlando la temperatura de vaciado a la cazuala a 1 600°C, y la de vertido en el molde de 1 550-1 580°C.
- A través de las operaciones descritas se puede establecer el comportamiento microestructural del acero austenítico fundido HK-40.
- Los ensayos de dureza se realizan en cinco puntos de la cara superficial de las probetas, con el empleo de un durómetro digital que utiliza como penetrador un cono de diamante con un ángulo de 136°, siendo la carga aplicada de 1471 N en un tiempo de 15 segundos.

CAPÍTULO 3.

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

3.1. Introducción

El comportamiento físico-metalúrgico de la aleación objeto de estudio es corroborado por los resultados obtenidos en los ensayos propuestos, los cuales están explícitos en el presente capítulo como resultado del procesamiento y análisis de la información obtenida a través del desarrollo de los experimentos.

Se tiene como **objetivo**, realizar la valoración de los resultados y la explicación de los fundamentos científicos que dan solución al problema planteado, a partir de la interpretación de las regularidades observadas.

3.2. Análisis de la composición química obtenida

El resultado de la composición química lograda se observa en la tabla 3.1, a partir de sacado el promedio de tres mediciones en cada muestra de aleación. El porcentaje de cada uno de los elementos de aleación que intervienen en la composición de la aleación se encuentran dentro del rango permisible por los estándares establecidos, por lo que se confirma que la aleación ensayada es el acero HK-40. En el análisis se define que los elementos más representativos en la aleación lo constituyen el Cr con 24,23 %, el Ni con 17,98 %, el carbono con 0,4 % y el hierro que representa junto con el carbono la base de las aleaciones de acero y completa el 100 % de la composición.

Tabla 3.1. Composición química del acero austenítico HK-40, en %

C	Mn	Si	Cr	Ni	Fe
0,423	0,846	0,580	24,23	17,98	Balance

El elemento níquel amplía el campo de estabilidad de la austenita, además de que rebaja la temperatura a la que ocurre la transformación ferrita-austenita, de tal manera que las aleaciones hierro-níquel pueden presentar estructura austenítica a temperatura ambiente. Aumenta la resistencia a la tracción y el límite elástico del acero, además de elevar su tenacidad y su dureza. También aumenta la resistencia a la corrosión.

El cromo aumenta la resistencia a la tracción, aumenta la dureza y la tenacidad y da resistencia a la abrasión y al desgaste. Produce resistencia a la corrosión y a la oxidación, al disolverse en la austenita aumenta también la templabilidad.

El carbono ejerce una gran influencia sobre las propiedades físicas y mecánicas del acero. Eleva su resistencia, dureza y templabilidad. El aumento del carbono en la fundición eleva de forma creciente la resistencia al desgaste.

De manera general los elementos presentes en la composición química del acero estudiado le garantizan propiedades de resistencia a la abrasión, al desgaste y la corrosión, elevando la durabilidad de la aleación.

3.3. Análisis microestructural de las muestras

Con el fin de determinar la forma, tamaño y distribución de las diversas microestructuras presentes en la aleación objeto de estudio, se realizó el análisis microestructural a la aleación preparadas mecánicamente.

El modelo básico de la microestructura de las aleaciones es la disposición en celdillas de los granos poliédricos (cristales). La determinación del tamaño de grano de materiales policristalinos es probablemente la única medida metalográfica más importante, porque de la influencia del tamaño de grano son sus propiedades y comportamiento. El tamaño de estos granos oscila entre varios centímetros y centésimas de milímetros aproximadamente, según el estado del metal. En su forma más simple, la estructura tiene su origen en que, en cada grano, la disposición de los átomos es esencialmente regular, pero la orientación relativa de esta disposición varía de un cristal a otro.

En la figura 3.1 se observa la microestructura correspondiente a la muestra de la aleación de acero austenítico refractario HK-40. Esta microestructura es dendrítica, compuesta por una matriz austenítica rodeada con zonas interdendríticas de islas de carburos primarios del tipo $M_{23}C_6$. También existe ferrita en los límites de granos, en la que se observa precipitación de carburos (figura 3.2).

La precipitación en el acero HK-40 se debe a la disolución de los carburos primarios. Esta disolución ocurre al desestabilizarse el C y el Cr contenido en estos microconstituyentes. El primer elemento en difundir hacia la matriz es el C, al sobresaturarse esa región el Cr viaja de la zona interdendrítica hacia el centro de la matriz, para buscar zonas ricas en C y formar precipitados de la forma $M_{23}C_6$.

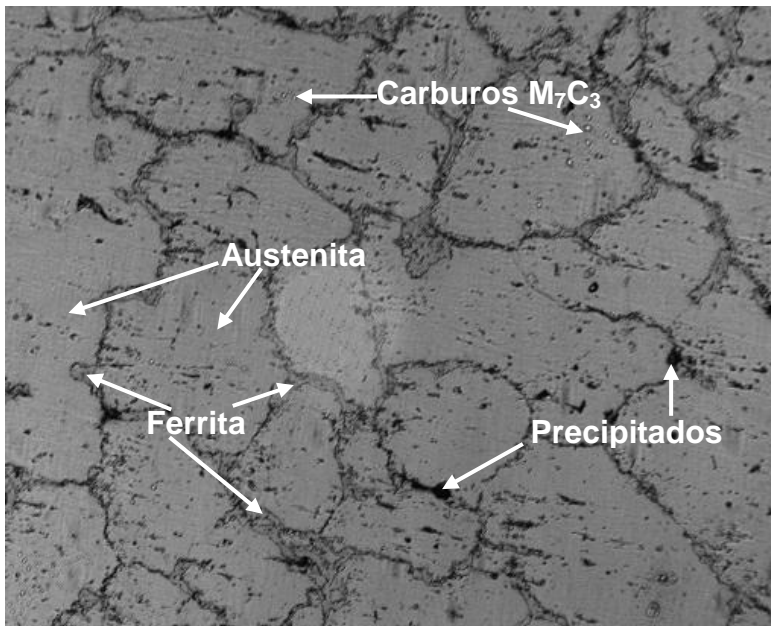


Figura 3.1. Microestructura de la aleación HK-40. x400.

La austenita es la solución sólida de carbono en hierro gamma y es capaz de disolver hasta 2,14 % C a 1 147°C. Está formada por cristales cúbicos centrados en las caras (FCC). Esta fase se extiende sobre una gran sección del diagrama Fe-Fe₃C. Es blanda, dúctil, tenaz y no magnética. El contorno de los granos es rectilíneo. Es estable por encima de la temperatura crítica Ac_1 (727°C).

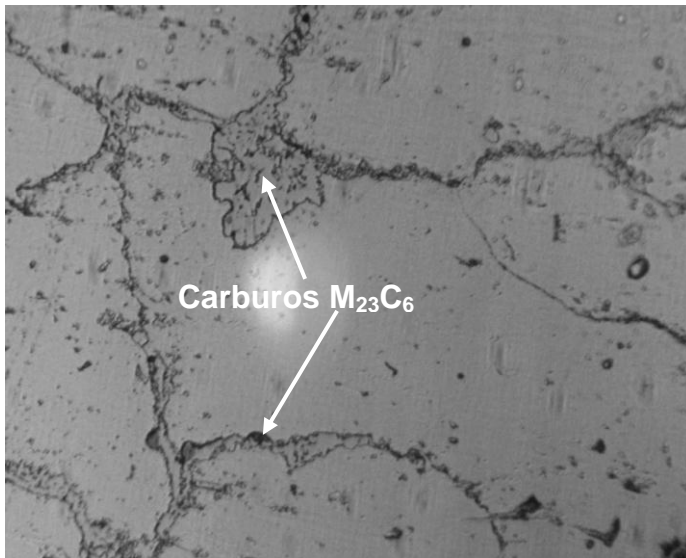


Figura 3.1. Microestructura de la aleación HK-40. x1000.

La estructura de la ferrita consiste prácticamente en hierro puro, la cual, a temperatura ambiente, es una solución sólida de tipo intersticial de carbono en hierro α , con una solubilidad máxima de aproximadamente 0,02 %. Este constituyente puede contener, además de una pequeña cantidad de carbono en solución sólida, otros elementos ya sea como residuales del proceso de fabricación o añadidos intencionalmente como elementos de aleación.

3.3.1. Análisis del porcentaje de microconstituyentes

En las microestructuras de los aceros, es posible determinar los porcentajes de las diferentes fases o mezcla de fases presentes y que son observadas con el empleo del microscopio. Los granos o cristales son los que determinan el comportamiento de las propiedades físico-metalúrgicas de las aleaciones, puesto que existe una relación directa entre microestructura y comportamiento mecánico (Albertin *et al.*, 2008).

En materiales aleados, en ocasiones se muestran otras fases entre las que se encuentran carburos y nitruros que varían positiva o negativamente las características esperadas de la aleación en estudio.

En la figura 3.3 a), se muestra la microestructura lograda y en la 3.3 b) una representación en colores de esta, con la que mediante un software informático se detectó el porcentaje de microconstituyentes presentes en la probeta, mostrado en un gráfico de pastel en la figura 3.4.

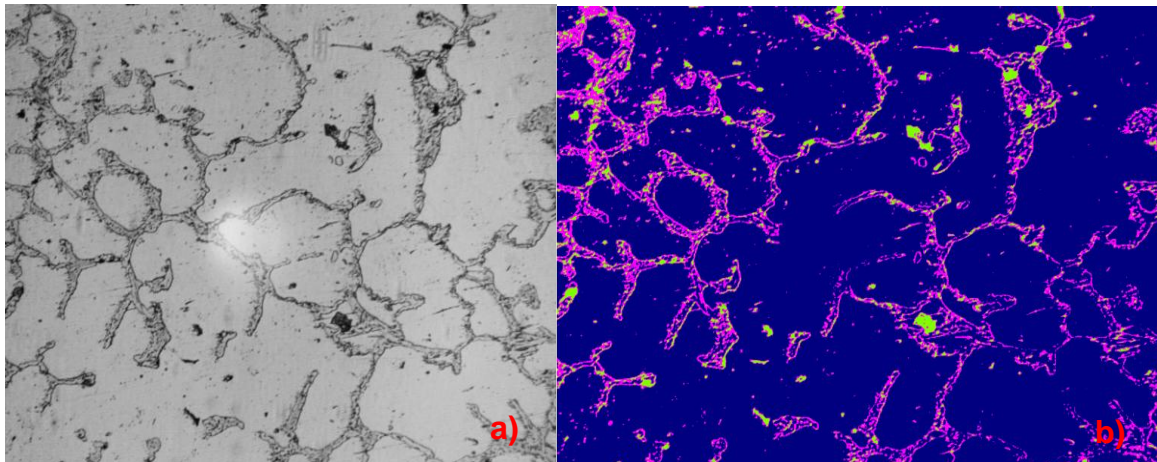


Figura 3.3. Representación en colores de la microestructura lograda.

Se corrobora que la austenita es el constituyente más denso en la aleación analizada. Este microconstituyente posee una dureza de 300 Brinell, una resistencia a la tracción de 100 kg/mm^2 y un alargamiento del 30 %.

Los carburos de hierro se consideran como el microconstituyente que más dureza aporta a la aleación estudiada, sin pasar por alto la austenita, con la que el elemento níquel forma soluciones sólidas de sustitución, ocasionando un notable endurecimiento.

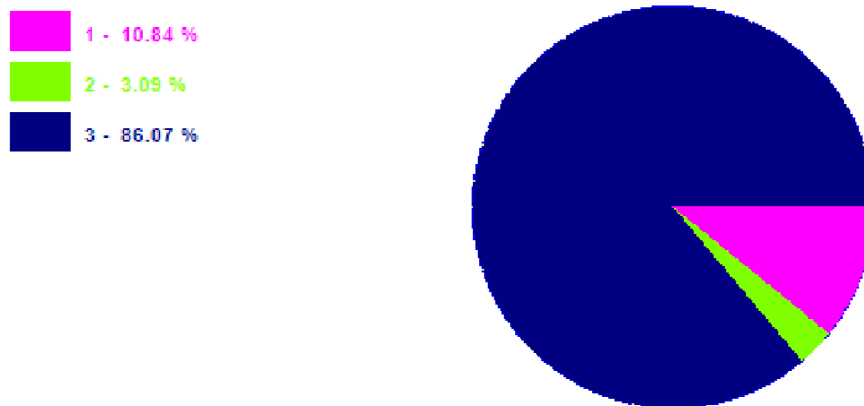


Figura 3.3. Distribución de las fases y porcentaje de microconstituyentes.

Los datos de los porcentajes de las fases detectadas, en conjunto con el área que ocupan, se muestran en la tabla 3.2. Los mismos están en correspondencia con el análisis microestructural realizado.

Tabla 3.2. Datos de las fases de los microconstituyentes para la muestra

Datos de la fase		
Microconstituyentes	Área μm^2	Área (%)
Austenita	724503	86,07
Ferrita	91232	10,84
Carburos	25993	3,09

3.4. Análisis de la dureza de las muestras

Con el objetivo de conocer las propiedades mecánicas que posee el acero austenítico en cuestión, se realizaron los ensayos de dureza a las muestras obtenidas.

Se toma el resultado cuantitativo, de cinco puntos diferentes de cada una de las probetas, mostrándose en la tabla 3.4. En la que se observa una dureza promedio de 166,8 HV, dureza esta que no presenta peligro para el trabajo como conducto de trasegar colas lixiviadas, puesto que estos no presentan solicitaciones de tracción ni impacto.

Tabla 3.4. Valores de dureza para el acero HK-40 %

Número de ensayo					Promedio
1	2	3	4	5	
Valores de dureza en HV					
163	174	165	168	164	166,8

La representatividad y el promedio de los resultados logrados en la prueba se verifican considerando la ecuación 2.1, expuesta anteriormente. En función de esto, a través de Calero (1976), se comprueba la eficacia el tamaño escogido de la muestra para que los resultados sean representativos del proceso objeto de estudio. Se tiene en cuenta el logro de un compromiso entre mayor representatividad, menor costo y mayor productividad, para que el muestreo sea eficiente.

3.5. Análisis de la microdureza de las muestras

El estándar ASTM E 92-82 define la dureza Vickers como un método de ensayo por indentación, por el cual, con el uso de una máquina calibrada, se fuerza un indentador piramidal de base cuadrada que tiene un ángulo entre caras específico, bajo una carga predeterminada, contra la superficie del material a ser ensayado y se mide la diagonal resultante de la impresión luego de remover la carga (figura 3.4).

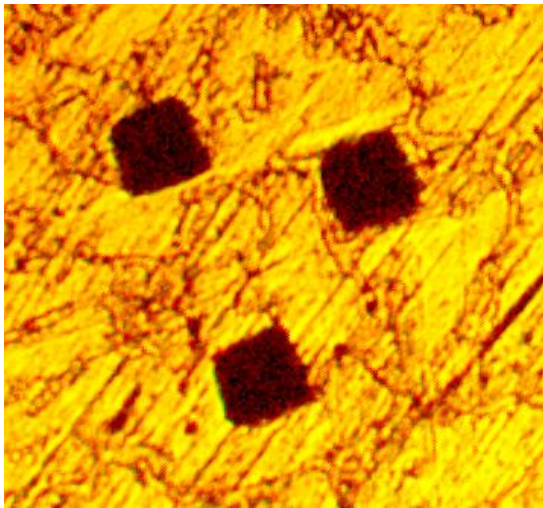


Figura 3.4. Zonas para la medición de dureza y microestructural.

Los ensayos de indentación instrumentados se llevan a cabo en el modo convencional o en el modo de operación de medición continua de la rigidez, se emplea indentadores Vickers. Se realizó el análisis de microdureza según los procedimientos considerados anteriormente, arrojando un valor de 129, 9 HV.

3.6. Costo de fabricación de la tubería en T

Para el costo de fabricación de la tubería en T se tuvo en cuenta el costo de producción según lo consumido en Materias Primas y materiales, Gastos de elaboración, gastos directos, Gastos de fuerza de trabajo, Gastos indirectos de producción, Gastos generales y de administración, Gastos bancarios, Costo de producción entre otros aspectos. Los mismos se exponen en la tabla 3.5 y dan un valor total de 13 178,90 CUP y 9 632,74 CUC y dan un valor total de \$ 22 811,64.

Tabla 3.5. Ficha de costo de la tubería en T

Conceptos de Gastos	Total	CUC
Materias Primas y materiales	9 965,28	8 759,91
Materiales	7 787,52	6 746,56
Combustibles y lubricantes	24,75	24,75
Energía eléctrica	464,83	464,83
Útiles y herramientas	1 688,18	1 523,77
Otros gastos directos	584,17	201,57
Depreciación	276,23	0,00
Otros servicios productivos	182,28	92,17
Ropa y calzado (trab. Directos)	125,67	109,40
Gastos de fuerza de trabajo	788,92	47,63
Salarios	723,18	0,00
Vacaciones	65,74	0,00
Estimulación en divisas	0,00	47,63
Gastos indirectos de producción	1 267,72	419,79
Depreciación	45,59	0,00
Materiales	219,87	208,61
Combustibles y lubricantes	32,49	32,49
Energía eléctrica	33,51	33,51
Salarios	582,04	0,00
Otros gastos	354,21	145,19
Gastos generales y de administración	379,59	169,17
Materiales	17,88	16,99
Combustibles y lubricantes	12,41	12,41
Depreciación	5,92	0,00
Energía eléctrica	5,99	5,99
Salarios	186,88	0,00
Otros gastos	150,51	133,79
Gastos bancarios	193,22	34,66
Gastos bancarios	193,22	34,66
Costo de producción	13 178,90	9 632,74
Impuestos y contribuciones	295,99	0,00
Contribución a la Seguridad Social	194,73	0,00
Gastos de Seguridad Social a Corto Plazo	23,37	0,00
Impuestos por la Utilización de la Fuerza de Trabajo	77,89	0,00
Margen de utilidad S/ Base autorizada	96,41	0,00
Precio establecido por el MFP	13 571,29	0,00
Componente en pesos convertibles	0,00	9 632,74

3.7. Planteamiento de los efectos sociales y ambientales

El desarrollo de toda actividad humana conlleva a la producción, en mayor o menor medida, de algún tipo de residuo, sean éstos sólidos, líquidos o gaseosos, o alguna combinación de ellos (Martínez, 2001). La población actual está impulsada por un modelo de desarrollo económico, político y social que representa las características de una sociedad de consumo, desperdicio de recursos naturales y generación de residuos (Rico et ál., 1994). La naturaleza y composición de los residuos sólidos, líquidos urbanos y rurales es variable y depende del tipo de actividad que se realice. Estas características determinan las modalidades y precauciones con que deben ser manejados para evitar la generación de problemas ambientales y de salud que puedan afectar a la comunidad (Martínez, 2001).

Las colas líquidas son generadas como un subproducto de la producción en la UBP Planta de lixiviación y lavado que sirve de materia prima a la UBP Planta de Recuperación de Amoníaco y Cobalto, de donde son procesadas para recuperar el níquel, el cobalto y el amoníaco, para finalmente ser generada como desechos de la planta. Una vez, que esta se convierte en desecho, es enviada de los alambiques por gravedad para el foso de cola de donde se bombea para la presa de cola. La que se derrama de los alambiques se baldea para el nivel cero y de este pasa para la piscina, de donde es bombeada para el foso de cola (figura 3.4).



Figura 3.4. UBP Planta de Recuperación de Amoníaco y Cobalto. Fosos de cola.

Estas averías, aunque se detectan rápidamente y son reparadas por la brigada encargada del mantenimiento y reparación de la UBP, no evitan que se evidencien daños al entorno laboral en sus inmediaciones.

3.7.1. Población vinculada al área de riesgo

Los trabajadores encargados del manejo interno de los desechos peligrosos son las personas más expuestas a los riesgos y peligros asociados a estos residuos. Debido a que no es posible dar respuesta internamente al problema que significa su generación, durante el traslado de los desechos hasta los sitios de eliminación y/o tratamiento, una parte de la población puede verse expuesta debido a accidentes como derrames; los tres tipos de liberación identificados son:

- Descargas accidentales durante el almacenamiento, transporte y operaciones de manejo en general (derrames, incendios).
- Descargas no controladas o derivadas de inadecuadas prácticas de tratamiento y/o disposición final (ejemplo: descargas en cursos de agua, quemas a cielo abierto).
- Descargas controladas, ejemplo de ello son las emisiones resultantes de las etapas de generación, tratamiento y disposición final (lixiviados, efluentes).

De estas prácticas pueden resultar afectaciones reales y potenciales a ecosistemas o recursos de importancia; la magnitud del daño puede estimarse a partir de los siguientes criterios.

Características peligrosas del desecho: está referido al riesgo que para la salud humana y el medio ambiente representa el desecho, en función de la peligrosidad intrínseca de la sustancia (s) que le confieren la característica peligrosa (corrosivos, tóxicos).

Tasa de generación estimada: altos volúmenes representan un mayor riesgo que pequeñas cantidades, fácilmente manejables y con un menor impacto sobre la salud el ambiente.

Prácticas de manejo: una inadecuada gestión impacta negativamente sobre el ambiente, afectando la salud de los trabajadores y la población en general.

3.8. Conclusiones del capítulo

- El resultado obtenido de la composición química muestra que los elementos más representativos en la aleación lo constituyen el Cr con 24,23 %, el Ni con 17,98 % y el carbono con 0,4 %.
- Se obtuvo como resultado que el acero austenítico refractario HK-40 posee una microestructura dendrítica, compuesta por una matriz austenítica rodeada con zonas interdendríticas de islas de carburos primarios del tipo $M_{23}C_6$.
- El costo de fabricación de la pieza tiene una cuantía en moneda nacional y en divisa de 13 178,90 CUP y 9 632,74 CUC para un valor total de \$ 22 811,64.

CONCLUSIONES GENERALES

- El acero austenítico refractario HK-40 ensayado, posee una dureza promedio de 166,8 HV. Por esta razón, se estima que no presenta peligro para el trabajo como ducto de transportar colas lixiviadas, puesto que estos no se someten a solicitaciones de tracción ni impacto.
- La microestructura dendrítica, compuesta por una matriz austenítica rodeada con zonas interdendríticas de islas de carburos primarios de tipo $M_{23}C_6$. Con la existencia de ferrita en los límites de granos, en la que se observan precipitados de carburos, es adecuada para usarse con el fin previsto. Puesto que se corresponde con la microestructura patrón de la aleación.
- La precipitación en el acero HK-40 se debe a la disolución de los carburos primarios al desestabilizarse el carbono y el cromo contenido en estos microconstituyentes. El primer elemento en difundir hacia la matriz es el carbono. Al sobresaturarse esa región el cromo viaja de la zona interdendrítica hacia el centro de la matriz, para buscar zonas ricas en carbono y formar precipitados de forma $M_{23}C_6$.

RECOMENDACIONES

Chequear temporalmente el comportamiento de la aleación con respecto al grado de abrasividad de del flujo transportado por la tubería.

BIBLIOGRAFÍA

1. ALBERTIN, E.; SINATORA, A.; PITALUGA, G. & PARADA, A. 2007: Relación entre factores micro-estructurales e impacto repetido en aleaciones de alto cromo para bolas de molino. *Ingeniería Mecánica*. 1 (2008): 57-62.
2. ALCÁNTARA, D.; FERNÁNDEZ, T. & RODRÍGUEZ, I. 2009: Fricción y desgaste en elementos circulares empleados en pasadores. *Ingeniería Mecánica*. 12(2): 49-58.
3. ALCÁNTARA-VALLADARES, J. R. 2008: Diseño práctico de un molino de bolas. Tesis de grado. Escuela superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. Unidad profesional "Azcapotzalco". 123 p.
4. Bedolla-Jacuinde A, Correa R, Mejía I, Quezada J G, Rainforth W M. The effect of titanium on the wear behaviour of a 16%Cr white cast iron under pure sliding. *Wear* 2007; 263:808–820
5. BELZUNCE, F. J. 2001: Aceros y fundiciones: estructuras, transformaciones, tratamientos térmicos y aplicaciones. Asturias, Universidad de Oviedo, 208 p. Disponible en: <http://www.aceroplatea.es/docs/documento138.pdf>.
6. CALLISTER, W. 1999: *Materials Science and Engineering. An Introduction*. Fifth Edition. Department of Metallurgical Engineering. University of Utah. John Wiley & Sons. 8195 pp.
7. CALLISTER, W. 2007: *Materials Science and Engineering. An Introduction*. 7th ed. John Wiley & Sons, Inc. New York, United State, 975.
8. CALLISTER, W. D. 2009: *Materials Science and Engineering. An Introduction*. 5 ed. Félix Varela, La Habana, 871 p.
9. DARBY, R. 2001. Take the mystery out of non-neutronian fluids. *Chemical Engineering*, 3: 66-73.
10. DOGAN, O.; HAUKE, J. & LAIRD, G. 1997: Solidification Structure and Abrasion Resistance of High Chromium White Irons *Metallurgical and Materials Transactions A*. 28 (3) 23-28.

11. Dogan, O.; Hawky, A.; Laird, G., II Met. Mater. Trans. 28 A (1997) 1315 – 1328
12. García Lira J1, Castillo Sánchez, M2, Rodríguez Ayala S.1 Viveros Bretón S1. Carbajal Manuel1. 2010. Estudio de la precipitación de carburos en un acero inoxidable austenítico HK-40 de alta resistencia al calor.
13. GRESESQUI, E. 2018: Características microestructurales, reticular y de microdeformación de aceros empleados en elementos moledores de clínquer. Ing. Isnel Rodríguez González, Dr. C. y Ing. Tomás H. Fernández Columbié, Dr. C. (tutores). Tesis de maestría. Instituto Superior Minero Metalúrgico. 79 p.
14. IZQUIERDO, R. 2001. Hidrotransporte del mineral laterítico en régimen estructural. Minería y Geología. 18 (2) : 53-59
15. MARTINEZ-LOZANO, G. 2007: *Análisis de parámetros microestructurales: tamaño de cristalita y microdeformación de Compuestos Tipo Hidrotalcita de Cobalto*. Miguel Hesiquio-Garduño (Tutor). Tesis para obtener el grado de Maester en Ciencias. Instituto Politécnico Nacional (Méjico D. F.). 96 p.
16. PERO-SANZ, J., 2000: Ciencia de los materiales. Metalurgia Física: Estructura y Propiedades, 3ra ed. Editorial DUSSAT SA, España, 502 p.
17. Pero-Sanz, J.A.; Fundiciones Férrreas cap. VIII-IX; Editorial Dossat, S.A. Madrid 1994
18. Petty, E., Physical Metallurgy of Engineering Materials. George Allen and Unwin Ltd. Londres, 1968. p 109. Walton, C., Castings Iron Handbook. Iron casting Society, Inc. 1981.
19. Ponce, N., 1979: “Mineralogía y composición sustancial del yacimiento artificial Colas de Nicaro”, La Minería en Cuba, 5 (3) : 30-36.
20. RAYMUNDO LUIS ROJAS 2004, Tesis estructura metalúrgica de un acero HK-40 a medias temperaturas.
21. Roach, D. B. and VanEcho, J. A., Comparison of the Properties of the HK-40 and HK-45 Cast Heat Resistant Alloys Stainless Steel Castings, ASTM STP 756, V. G. Beahal and A. S. Melilli, Eds., ASTM., 1983, pp. 130-142.

- 22.** ROJAS, A.L. & TURRO B., A. 2003. Composición Mineralógica de las colas del Proceso CARON en Moa, Holguín, Cuba, *Minería y Geología* 19 (3-4): 21-28.
- 23.** Smith, William. 2005. *Fundamentos de la ciencia e Ingeniería de Materiales*, Concepción Fernández España, Madrid.
- 24.** Tabrett, C.; Sare, I., *Fracture Toughness of High-Chromium White Irons: Influence of Cast Structure* *Journal of Materials Science*, 3, 2069-2077; 2000.
- 25.** TURRO B., A.; GARCELL, L. & IZQUIERDO, R. 2002. Influencia de diferentes factores sobre el comportamiento reológico de las suspensiones de desechos lixiviados (colas) del proceso Industrial CARON. *Tecnología Química*, 3 :27-34.
- 26.** Weibert H. W., *Fabrication of HK-40 in the field*, 1975, *Metchem Meeting of American Society for Metals* in Houston, Texas, pp. 939-943.